

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.05.012

郝明飞, 徐勇将, 刘元法, 等. 植物油料热预处理方式对油脂品质影响的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 93-100.

HAO M F, XU Y J, LIU Y F, et al. Research progress on the effect of thermal pretreatment methods of oilseeds on oil quality[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(5): 93-100.

植物油料热预处理方式对 油脂品质影响的研究进展

郝明飞¹, 徐勇将^{1,2}, 刘元法^{1,2}, 叶展^{1,2}✉(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122;
2. 食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 食用油加工主要涉及油料预处理、油脂制取和精炼三个工段, 油料预处理是食用油制取的首要环节。油料热预处理对于提升出油率和改善产品风味等具有重要作用, 然而不良的热处理条件则破坏微量营养素, 导致危害物因子产生, 影响食用油营养和安全品质。总结了植物油料的高温烘烤、红外、微波、超声波等主要加热预处理类型和作用特点, 概述了不同热处理方式对油料出油率、油脂基本品质、营养素和危害成分的影响, 可为开发植物油料柔性稳态预处理技术, 实现油料油脂精准适度加工, 提升食用油营养与安全品质提供一定参考。

关键词: 植物油料; 热预处理; 出油率; 油脂品质与安全

中图分类号: TS224.2; TS225.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2024)05-0093-08

网络首发时间: 2024-08-29 08:19:46

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20240827.1502.008>

Research Progress on the Effect of Thermal Pretreatment Methods of Oilseeds on Oil Quality

HAO Ming-fei¹, XU Yong-jiang^{1,2}, LIU Yuan-fa^{1,2}, YE Zhan^{1,2}✉

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: The processing of edible oil mainly involves three stages: oilseed pretreatment, oil extraction, and oil refining. Oilseed pretreatment is the primary step in edible oil production. Thermal pretreatment of oilseeds plays a crucial role in improving oil yield and enhancing product flavor. However, poor thermal treatment conditions can destroy micronutrients and lead to the formation of harmful substances, affecting the nutritional and safety quality of edible oil. This study primarily focused on various thermal pretreatment

收稿日期: 2024-02-21

基金项目: 十四五国家重点研发计划 (2023YFD2100400); 山东省重点研发计划 (2023TZXD010); 中央高校基本科研业务费专项 (JUSRP123045)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 14th five-year plan, China (No. 2023YFD2100400); Key Research and Development Project of Shandong Province (No. 2023TZXD010); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. JUSRP123045)

作者简介: 郝明飞, 男, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品脂质营养科学, E-mail: mingfei0521@163.com

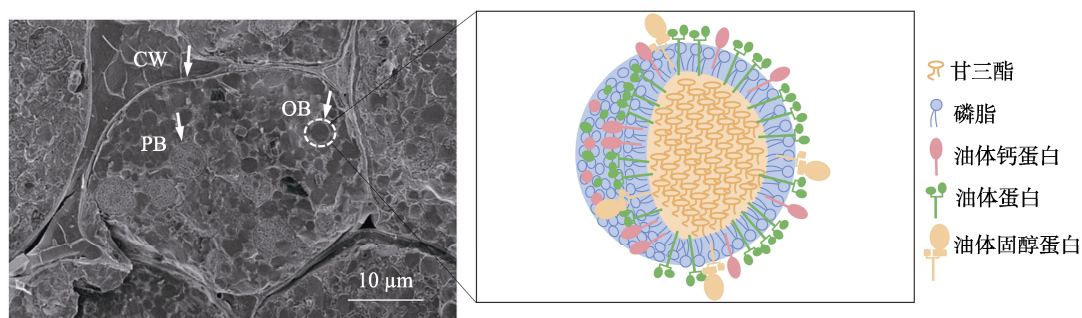
通信作者: 叶展, 男, 1989 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为食品脂质加工与营养基础, E-mail: yezhan@jiangnan.edu.cn

methods, such as high-temperature roasting, infrared, microwave, and ultrasonic treatment. It summarized the main types of thermal pretreatment and their characteristics in oilseed processing. Additionally, it provided an overview of the effects of different thermal pretreatment methods on oil yield, basic oil quality, nutrient content, and harmful components. This information served as a reference for developing flexible and stable pretreatment technologies for oilseeds, which could achieve precise and moderate oil processing, and improve the nutritional and safety quality of edible oil.

Key words: oilseeds; thermal pretreatment; oil yield; edible oil quality and safety

油脂在植物油料中以油脂体的形式存在, 油脂体的主要成分为甘三酯, 是在植物种子发育和成熟过程中形成的微小或亚微小的细胞器, 其外表面包裹着一层磷脂-内源性蛋白膜^[1]。这层油脂体膜给予其良好的弹塑性, 可以阻止种子因失水、

复水、冻融等环境变化对油脂体产生损伤, 同时也可以抵抗一些化学试剂如氯化钠等引起的损伤^[2]。油料预处理中细胞结构被破坏, 油脂体膜结构也被破坏, 在解除磷脂膜和蛋白膜的阻力后, 油滴更容易发生聚集, 变成大的油滴颗粒 (图 1)^[3]。



注: CW: 细胞壁; PB: 蛋白体; OB: 油脂体。

Note: CW: cell wall; PB: protein body; OB: oil body.

图 1 植物油料细胞 (左) 和油脂体结构示意图 (右)^[4-5]

Fig.1 Cell structure of oil seeds (left) and structure of oil body (right)^[4-5]

油料预处理是指在制油前对油料进行清理除杂、调节水分等一系列过程, 主要目的是去除杂质并将其制成具有一定结构性能的物料, 以符合不同制油工艺条件要求^[6]。油料没有经过预处理直接制油, 可以极大程度的保留热敏性物质, 避免微量活性成分的损失, 但会导致出油率低, 不适宜工业应用。适度的预处理不仅可以提高出油率和油脂品质, 还能促进一些风味物质如吡嗪与呋喃类等物质的生成^[7]。

油料加热预处理是植物油料制油过程中的重要环节, 对出油率、风味、理化指标及营养素迁移等具有重要影响 (图 2)。同时, 油料在热作用下也会发生化学反应产生有毒有害成分, 对植物油的食用安全造成隐患。本文主要通过总结油料加热预处理的类型, 以及不同热处理方式对油料出油率、油脂基本品质、营养素和有害成分的影响, 以期对油料热预处理的精准加工提供参考。

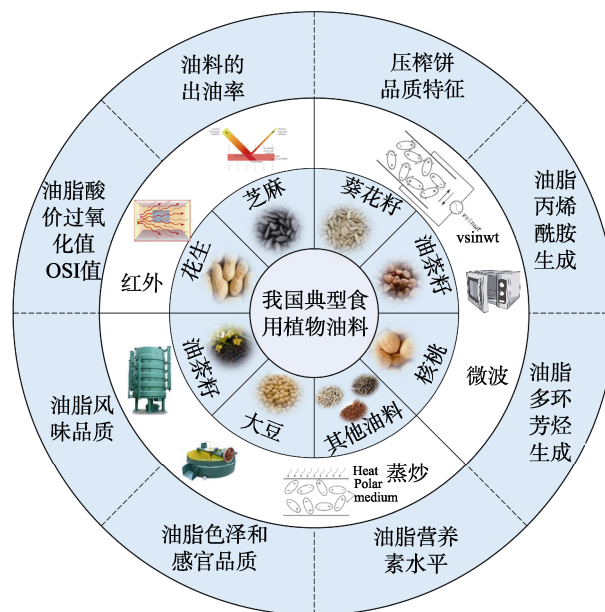


图 2 植物油料制油加热预处理对油脂品质的影响

Fig.2 The effect of heating pretreatment on oil quality of oilseeds

1 植物油脂制取过程中油料热预处理工艺

1.1 油料热预处理方式及其特征

油脂制取需经过油料脱皮、干燥、挤压膨化等预处理,相比于多数传统预处理方式,微波、红外、超声波等新技术体现出较大优势^[8]。高温烘烤是指油料在高温条件下快速的传质传热方式破坏油料的微观结构以提高油脂提取率^[9]。高温条件下,油料内部的油脂流动加快,蛋白发生变性,制油后饼粕弹塑性得到加强^[10]。红外是依据油料内部分子吸收与其相似波长能量,促进油料内部分子运动,从而提高出油率,不仅传热效率高、无污染,具有可控性好等优良特性^[11]。微波烘烤是油料在高频电磁场,内部的极性分子发生振动,并随着微波的周期变化摩擦产热,具有作用效率高、加热速度快、时间短和穿透力强等优势^[12]。超声波辅助预处理主要是利用其空化效应,破坏油料的细胞壁结构、减小颗粒尺寸和增

强细胞内外的能量传递,进而促进细胞内物质的释放^[13]。

1.2 不同热预处理方式对油料出油率影响

热预处理会使油料的细胞壁及油体膜结构破裂,油脂更容易释放。研究发现油菜籽在经过微波^[14-15]、红外^[16]等处理后,出油率均高于未处理的菜籽。同样,在花生^[17]、芝麻^[18]等油料的加工中也得到类似的结果。但也有发现油料经过热预处理后出油率下降,Gao P^[19]等对核桃分别进行微波、烘箱、蒸汽三种加热预处理,结果发现压榨后油料的出油率降低,这可能是处理后油料细胞结构塌陷,堵塞了油脂释放。Moradi N^[20]等对葵花籽进行超声波、脉冲电场预处理,结果显示单独使用超声波或脉冲电场出油率要远远高于两者联用。因此,在选用热预处理方式中要综合考虑其对油料细胞的作用,促进油脂释放。表 1 总结了热预处理方式对油料出油率的影响。

表 1 植物油料热预处理方式对油料出油率的影响
Table 1 The effect of heating pretreatment on oil yield of oilseeds

油料	预处理方式	预处理条件	出油率影响情况	参考文献
油菜籽	微波	800 W, 2 450 MHz 的频率以 1 min 的间隔处理油菜籽 1~8 min	中低硫代葡萄糖苷蓝型饼粕油量分别从 44.9%和 42.6%下降到 13.5%和 11.3%	[14]
	微波	800 W, 7 min	中油杂 19 和迪达 119 出油率分别提高 5.89%和 9.68%	[15]
	红外	110~170 °C, 厚度为 5 mm, 20 min	170 °C 下油菜出油率从 23.26%提高至 27.55%	[16]
核桃	微波/烘箱/蒸汽	微波:540 W, 2 450 MHz, 10 min;烘箱:160 °C, 10 min; 蒸汽: 160 °C, 0.54 MPa, 10 min	微波处理后核桃油出油率由 46.31%降至 40.73%	[19]
芝麻	烘箱	180~220 °C, 10-30 min	处理后出油率提高	[21]
	微波	700 W, 2 450 MHz 下处理 5 mi	提取率增加 33.75%	[22]
花生	干空气烘烤	140、160 和 180 °C, 5 和 10 min	由 41.17% 升至 46.28%	[23]
	红外	150 °C 持续 55 min	出油率提高了 8.74%	[17]

2 油料热预处理对油脂品质的影响

油料热预处理改变出油率,影响油脂的酸值、过氧化值、色泽、抗氧化能力等理化性质。适度处理对油料中多酚、甾醇、生育酚、角鲨烯等微量成分的释放起到促进作用,而激烈的预处理,如高温炒籽、极度膨化等,又会破坏这些微量营养素^[24]。此外,研究还发现热预处理过程中伴随着一些化学反应,如美拉德反应、脂质氧化、糖降解等,不仅影响油脂风味、色泽等基本品质,还与一些危害因子如苯并芘、杂环胺、3-氯丙醇酯(3-MPCD)、缩水甘油酯(Glycidyl methacrylate, GE)等生成和变

化相关^[21,25]。

2.1 油脂基本理化品质特征

油料经热预处理后,油脂品质发生变化,Zhou Q^[14]等对油菜籽微波处理后发现油脂具有更强的坚果和烘烤风味,氧化稳定性显著增强^[26]。Li D^[15]等也得到了类似的结果。对花生进行微波处理,随着微波时间的延长,花生油的酸值、过氧化值提高,色泽加深,氧化稳定性增强,且吡嗪类等烘烤风味增强^[22]。同时,花生干空气烘烤处理时发现 180 °C 烘烤 10 min 的花生油中,氧化稳定性指数、自由基清除活性和美拉德反应产物增加,而过氧化值和

共轭二烯降低, 5-羟甲基糠醛的水平和非酶褐变指数显著增加^[23]。Moradi N^[20]等对葵花籽进行超声波、脉冲电场预处理, 结果显示处理略微增加了油酸的游离酸度。不同热预处理方式对油脂的理化品质影响不同, 相同的预处理方式对不同的油料也有不同的结果, 油脂加工中应结合油料及相应的热预处理方式等综合因素, 提高油脂基本品质。表 2 总结了热预处理方式对油料基本品质的影响。

表 2 植物油料热预处理方式对油脂基本品质的影响
Table 2 The effect of heating pretreatment on oil fundamental property of oilseeds

油料	预处理方式	处理条件	基本品质变化	参考文献
油菜籽	微波	800 W, 2 450 MHz, 1~8 min	处理 3 min 后 4-异硫氰酸根-1-丁烯减少了 97%; 6 min 后出现吡嗪化合物	[14]
	红外	110~170 ℃, 厚度 5 mm, 20 min	(1) 酸值由 0.35 增加到 0.77 mg/kg (2) 过氧化值从 0.42 升高至 1.65 mmol/kg (3) 氧化诱导时间由 4.35 升高至 8.67 h (4) 自由基清除能力由 819.61 上升至 1 063.22 mg/kg	[16]
花生	微波	700 W, 2 450 MHz, 5 min	(1) 酸值由 0.31 升高至 0.47 mgKOH/g 油 (2) 过氧化值由 0.54 升高至 5.30 meqO ₂ /kg 油 (3) 颜色逐渐由淡黄色变为浅棕色 (4) 氧化诱导时间由 6.34 升高至 17.05 h (5) 吡嗪类等烘烤风味增强	[22]
	烘箱	120、140 和 160 ℃下烘烤 10 min	(1) 过氧化值由 5.48 升高至 8.67 meqO ₂ /kg (2) 色泽由暗黄色变为红棕色	[27]
	红外	150 ℃, 55 min	(1) 过氧化值由 0.41 升高至 0.88 meq/kg (2) 酸值由 0.26 降至 0.24 mgKOH/g (3) 氧化诱导时间由 5.53 升至 6.36 h	[17]
葵花籽	超声场/脉冲电场	超声 40 kHz; PEF1.1 kV/cm	(1) PEF 处理油酸的游离酸度从 0.80%增加至 0.84%	[20]
	微波	900 W, 2 450 MHz 处理 3、4、5、6、7 min	(1) 色泽加深, 红值和黄值增加 (2) 过氧化值从 1.42 增至 3.73 后降至 0.36 meq O ₂ /kg (3) 杂环化合物的总浓度呈指数增加	[28]
南瓜籽	微波/烘箱	700 W, 240 s	氧化诱导时间由 3.77 提高至 4.53 h	[29]
核桃	微波/烘箱/蒸汽	微波: 540 W, 2 450 MHz, 10 min; 烘箱: 160 ℃, 10 min; 蒸汽: 160 ℃, 0.54 MPa, 10 min	(1) 烘箱和蒸汽处理的酸值分别由 0.45 降低至 0.14 和 0.33 mg/kg (2) 微波处理后过氧化值由 5.56 降至 2.45 mmol/kg (3) 微波处理后氧化诱导时间由 1.80 升高至 2.63 h	[19]
芝麻	烘箱	180~220 ℃, 10~30 min	(1) 色泽加深 L*和 b*值显著降低 (2) 过氧化值由 4.48 升高至 7.46 meqO ₂ /kg	[18]
山茶籽	热风/蒸汽/膨化	热风: 60 ℃, 40 min; 蒸汽: 100 ℃, 15 min; 膨化: 800 rpm	(1) 酸值升高, 蒸汽处理的酸值最高达到 2.2 mg/g (2) 自由基清除能力成倍数增加	[30]

注: PEF: 脉冲电场; L*值表示明亮程度: -180 (black) to +180 (white); a*表示红绿值: -180 (green) to +180 (red); b*表示黄蓝值: -180 (blue) to +180 (yellow)。

Note: PEF: pulsed electric field; L* value indicates brightness: -180 (black) to +180 (white); a* indicates red-green value: -180 (green) to +180 (red); b* indicates yellow and blue values: -180 (blue) to +180 (yellow).

2.2 油脂微量伴随营养素

油脂不仅为人体提供能量、必需脂肪酸, 还含有许多生物活性物质如生育酚、多酚、植物甾醇等, 赋予油脂优异的生理功能^[31]。对核桃进行微波、烘箱、蒸汽三种热处理时发现, 热处理对核桃油中生育酚、角鲨烯和总酚含量的提高均有效果, 但同时也导致了甾醇含量的降低, 这可能是因为甾醇在热的作用下经历了氧化、异构化、

脱羟基、水解、脱氢等分子间转化反应^[19]。Wang M^[30]等对山茶籽采用热风、蒸汽、膨化预处理, 发现膨化和热风处理提高了油中生育酚的含量, 蒸汽和膨化提高了游离酚含量, 三种预处理均降低了山茶油中共轭酚和不溶性结合酚的含量。Ciou J Y^[27]等分析花生油中抗氧化成分与氧化稳定性的关系时, 采用烘箱处理花生, 发现随着温度的提高, α-生育酚含量降低, 总酚和甾醇含量

提高，氧化诱导期延长。Zhang D^[32]在分析干空气焙炒对花生油化学组分变化中也得到了相似的结论。表 3 总结了热预处理方式对油脂营养素变化的影响。

表 3 植物油料热预处理方式对油脂微量营养素的影响
Table 3 The effect of heating pretreatment on oil micronutrient of oilseeds

油料	预处理方式	处理条件	营养素变化	参考文献
油菜籽	红外	110~170 ℃, 厚度 5 mm, 20 min	(1) 生育酚含量在 150 ℃时比未处理增加 14.73% (2) 菜籽多酚的含量增加了 12 倍以上	[16]
	微波	800 W, 2 450 MHz, 1~8 min	(1) 中等和低硫代葡萄糖酸甘蓝型油菜种子中羟基葡萄糖芸苔素的含量分别降低了 50%和 53% (2) 芥子油苷羟基葡萄糖芸苔素发生热分解	[33]
	微波	800 W, 2 450 MHz, 120 s、240 s	(1) 植物甾醇提高 15% (2) 生育酚提高 55%	[26]
花生	微波	700 W, 2 450 MHz, 1~5 min	(1) 生育酚含量由 18.42 升高至 27.88 mg/g (2) 植物甾醇含量由 273.55 升高至 363.35 mg/g	[22]
	烘箱	120、140 和 160 ℃下烘烤 10 min	(1) α-生育酚含量由 72.33 降到 55.72 μg/g (2) 角鲨烯含量由 8.58 升高至 13.31 μg/g (3) 总酚含量由 18.31 升高至 36.64 mg/kg	[27]
	红外	150 ℃, 55 min	(1) 多酚含量提高 62.21% (2) 植物甾醇含量由 1 234.86 降至 1 182.62 μg/g (3) 生育酚含量由 461.68 降至 420.09 mg/kg	[17]
核桃	微波/烘箱/蒸汽	微波: 540 W, 2 450 MHz, 10 min; 烘箱: 160 ℃, 10 min; 蒸汽: 160 ℃, 0.54 MPa, 10 min	(1) 生育酚由 285.95 升 419.85、304.78、366.73 mg/kg (2) 甾醇含量由 1 474.18 下降 1 462.65、1 361.36、1 367.10 mg/kg (3) 角鲨烯含量由 8.39 升高至 9.60、9.91、8.86 mg/kg (4) 总酚含量由 6.48 升高至 13.12、12.27、10.59 mg/kg	[19]
芝麻	烘箱	180~220 ℃, 10~30 min	(1) 200 ℃加热 30 min 时总酚含量提高近 4 倍	[18]
山茶籽	热风/蒸汽/膨化	热风: 60 ℃, 40 min; 蒸汽: 100 ℃, 15 min; 膨化: 800 rpm	(1) 膨化和蒸汽生育酚含量分别提高了 5.28%和 5.26% (2) 角鲨烯含量分别降低了 6.46%、6.91%和 4.19% (3) 蒸汽处理使山茶油中总甾醇含量增加了 12.52%, 而热风和膨化处理使总甾醇含量降低了 6.09%和 23.13%	[30]

注: PEF: 脉冲电场; GAE: 没食子酸当量。
Note: PEF: pulsed electric field; GAE: gallic acid equivalent.

此外，油菜籽在微波物理场菜籽多酚 (canolol) 分子生成的机制研究中发现了生成 canolol 的前体物质，并推测出芥酸衍生物在微波物理场的作用下分子结构变化，为指导油菜籽加工工艺提供了更准确的参考^[34-35]。相似的研究在芝麻油的加工中也有所体现，芝麻林素发生热解生成芝麻酚类物质，延长了芝麻油的货架期^[36]。Li D^[15]等研究微波预处理下油菜籽中游离甾醇和结合甾醇的动态变化，结合态甾醇逐步降解生成游离态甾醇，更容易进入到油脂中，这也进一步解释了营养素在预处理作用下油脂中含量增加的原因^[37]。未来油料热预处理对油脂营养素迁移转化需更深次的研究，为指导油料预处理提供理论支撑。

2.3 油脂中风险因子水平

油料热预处理可以提高出油率，改变理化性质及微量营养素含量，而过度的预处理会导致油脂产

生一些危害成分如反式脂肪酸 (Trans fatty acids, TFAs)、多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、杂环胺、3-MPCD、GE 等。

2.3.1 反式脂肪酸 (TFAs)

人们最早关注 TFAs 是上世纪八九十年代，饮食中过量的 TFAs 会增加血清中低密度脂蛋白、总胆固醇含量，降低高密度脂蛋白含量，成为冠心病、动脉粥样硬化等慢性病的重要诱因^[38]。TFAs 主要来源于反刍动物瘤胃中细菌的微生物转化、油脂的部分氢化工艺、油脂精炼脱臭工艺、油脂高温煎炸等。油料热预处理也会形成 TFAs，Ahmed I A M^[18]等采用烘箱烘烤对不同产地的芝麻进行处理，结果显示从苏丹和土耳其获得的芝麻油中形成了反油酸和亚麻反油酸。Zhang D^[32]等在比较干空气烘烤和未处理制取花生油在促进健康和有害成分过程中，发现烘烤处理产生了 TFAs 并随着烘烤温

度升高和时间延长而增多。控制油料热处理的烘烤条件是降低植物油中 TFAs 生成的一个重要手段。

2.3.2 多环芳烃（PAHs）

与 TFAs 类似，PAHs 也是植物油加工中一种重要的危害成分，其含有疏水性的芳香环结构，对人体具有致癌作用^[39]。石龙凯^[40]等探究炒籽温度和时间对花生仁和芝麻籽制油中 PAHs 含量的影响，随着炒籽温度提高、时间延长，油脂中 Bap、PAH4、PAH16 等 16 种 PAHs 的含量显著增加。Wang M^[30]等在研究热风、蒸汽、膨化三种热处理方式对山茶油品质影响中发现膨化热处理显著增加了山茶油中苯并芘含量，这可能是由于膨化过程中的瞬时局部过热，会导致有机物的热解和苯并芘形成。Yin W T^[28]研究微波处理葵花籽仁，发现随着微波功率增大、时间延长，葵花籽油中 PAHs 含量增加。这可能是因为葵花籽是热敏感性的，当外部热量过高特别是油料受热不均匀时，PAHs 在热的作用下合成^[25]。

2.3.3 杂环胺

植物油中的杂环胺类物质主要指呋喃类、吡嗪类、吡啶类、吡咯类等，这些物质主要是由于油料热处理时发生美拉德反应产生的^[41]，其具有

较强的致癌和致突变性。Ji^[21]等研究发现芝麻烘烤会通过美拉德反应产生呋喃和丙烯酰胺等有害成分，引发蛋白质变性及维生素的降解。洪振童^[42]等采用顶空固相萃取-气质联用技术分析冷榨和热榨葵花籽油的挥发性物质时发现炒籽温度显著影响热榨葵花籽油中杂环胺的含量，当炒籽温度升至 170 ℃时，杂环胺含量最高为 36.84%。

2.3.4 其他危害成分

除上述危害成分外，油料热处理还会产生 3-MPCD、GE 等有害物质。3-MPCD 和 GE 主要形成于油脂精炼过程，这类物质对肾脏、睾丸和卵巢造成损害，对人体生育功能形成障碍^[43]。在油料热预处理中发现焙炒工艺也会形成，安浩^[43]对不同产地的葵花籽进行焙炒后压榨制油，采用不同的焙炒温度和时间，结果发现随着焙炒温度的升高、时间延长葵花籽油中 3-MPCD 呈升高趋势。因此焙炒处理的温度不宜过高，时间不宜过长。根据上述总结，我们发现油料热预处理对油脂中各种有害物质的生成具有重要影响。因此，在油脂制取过程中，不仅要考虑处理条件对油料理化指标和营养素的影响，也要减少有害物的生成。表 4 总结了热预处理对油脂危害成分影响。

表 4 热预处理对油脂危害成分影响
Table 4 The effect of heating pretreatment on oil hazardous components of oilseeds

油料	预处理方式	处理条件	危害因子变化	参考文献
芝麻	烘箱	180~220 ℃，10~30 min	检测到了反油酸和亚麻反油酸	[18]
	传统烘烤	60、180、200、220、240、260 ℃，10、20、30、40 和 50 min	芝麻油中 PAHs 含量由 21.84 升高至 133.03 μg/kg	[21]
花生	干空气烘烤	60、170、180 和 190 ℃持续 10、15、20、25 和 30 min	TFAs 随着烘烤强度增强而增加，TFAs 的最高含量为总 FA 的 0.18%	[32]
	微波	900 W，2 450 MHz 处理 3、4、5、6、7 min	(1) HCAs 由 0 增加至 820.6 ng/g (2) PAHs 由 7.78 ng/g 增加至 109.76 ng/g	[28]
葵花籽	高温蒸炒/微波烘烤	在 110、130、150、170 ℃和 190 ℃炒籽 30 min；微波 900 w 处理 0、3、4、5、6 和 7 min	(1) 微波处理 7 min，去甲哈尔满和哈尔满两种杂环胺含量分别为 518.76 ng/g 和 301.77 ng/g (2) 微波处理后，PAHs 增加了 26.38 ng/g，高温蒸炒处理后，PAHs 增加了 29.04 ng/g	[42,44]
	焙炒	200、220 ℃，15、20、30、40 min	3-氯丙醇含量在 0~1.08 mg/kg 范围上逐渐升高	[43]
山茶籽	热风/蒸汽/膨化	热风：60 ℃，40 min；蒸汽：100 ℃，15 min；膨化：800 rpm	膨化预处理显著增加了苯并芘含量，最高可达 5 μg/kg	[30]
花生仁、芝麻籽	高温蒸炒	160、180、200、220、240、260 ℃，10、20、30、40、50、60 min	(1) 160 ℃、60 min 的炒籽条件下，花生和芝麻 Bap 含量分别增加 11.6 倍和 3.2 倍 (2) 160 ℃条件下焙炒 60 min，花生和芝麻 PAH16 含量分别增加了 8.9 倍和 4.9 倍	[40]

注：TFAs：反式脂肪酸；FA：脂肪酸；HCAs：杂环胺；PAHs：多环芳烃；Bap：苯并芘。
Note: TFAs: trans-fatty acids; FA: fatty acid; HCAs: heterocyclic amine; PAHs: polycyclic aromatic hydrocarbons; Bap: Benzopyrene.

3 结论与展望

本文主要介绍了植物油料加工中油料热预处理的类型、作用方式以及对油脂品质的影响。油料在热预处理作用下油脂的出油率及理化性质会发生变化,一般情况下出油率会提高,自由基清除能力和氧化稳定性会增强,也有处理后出油率降低,这与油料细胞结构的变化有关;同时,油料热预处理也会改变油脂营养素含量的变化,这主要是因为营养素在油料热预处理后形态发生变化;最后油料热预处理过程中往往也伴随着其他化学反应如糖降解、脂质氧化、美拉德反应等,这些化学反应在增强油脂风味的同时往往也会产生有害成分如苯并芘、3-MPCD、GE、PAHs、TFAs等。目前油料热预处理工艺仍存在一些问题,未来的研究可以进一步探究预处理工艺对油脂中营养素变化、有害成分产生、美拉德抗氧化产物等化学反应的机制研究,为指导油料柔性稳态预处理工艺提供理论支撑。

参考文献:

- [1] SHIMADA T L, HARA-NISHIMURA I. Oil-body-membrane proteins and their physiological functions in plants[J]. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 2010, 33(3): 360-363.
- [2] TIAN T, ZAABOUL F, YIN S, et al. Studies on the lipid oxidation and oleosomes behavior in raw pecan kernels during storage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134867.
- [3] 从艳霞, 郑明明, 郑畅, 等. 微波技术对油菜籽品质影响研究进展[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(1): 151-156.
CONG Y X, ZHENG M M, ZHENG C, et al. Effect of microwave technology on qualities of rapeseed[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(1): 151-156.
- [4] CAPUANO E, PELLEGRINI N, NTONE E, et al. *In vitro* lipid digestion in raw and roasted hazelnut particles and oil bodies[J]. *Food & Function*, 2018, 9(4): 2508-2516.
- [5] ZAABOUL F, ZHAO Q, XU Y, et al. Soybean oil bodies: A review on composition, properties, food applications, and future research aspects[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107296.
- [6] 柏云爱, 张春辉. 我国油料预处理技术的现状及发展趋势[J]. *中国油脂*, 2005(7): 12-17.
BAI Y A, ZHANG C H. Current situation and development trend of oil pretreatment technology in China[J]. *China Oils and Fats*, 2005(7): 12-17.
- [7] 朱家彬, 李研财, 苏彩虹, 等. 油料预处理对油脂品质影响的研究进展[J]. *中国油脂*, 2023, 48(10): 16-24.
ZHU J B, LI Y C, SU C H, et al. Research progress on effects of oilseeds pretreatment on oil quality[J]. *China Oils and Fats*, 2023, 48(10): 16-24.
- [8] KASEKE T, OPARA U L, FAWOLE O A. Novel seeds pretreatment techniques: effect on oil quality and antioxidant properties: a review[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2021, 58(12): 4451-4464.
- [9] 刘春梅, 刘玉兰, 马宇翔, 等. 油菜籽炒籽温度对其油脂风味及综合品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(3): 67-74+83.
LIU C M, LIU Y L, MA Y X, et al. Effect of frying temperature on the flavor and comprehensive quality of rapeseed oil[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2020, 35(3): 67-74+83.
- [10] 韦东林, 魏冰, 孟橘, 等. 不同加工工艺制取菜籽油理化性质的研究[J]. *粮食与食品工业*, 2014, 21(6): 18-22.
WEI D L, WEI B, MENG J, et al. Study on physicochemical properties of rapeseed oil from different processing technologies[J]. *Cereal and Food Industry*, 2014, 21(6): 18-22.
- [11] 徐苇. 红外技术在食品工业中的应用[J]. *中国食品添加剂*, 2005(1): 86-89.
XU W. The application of infraed technology on food industry[J]. *China Food Additives*, 2005(1): 86-89.
- [12] GABER M A F M, TUJILLO F J, MANSOUR M P, et al. Improving oil extraction from canola seeds by conventional and advanced methods[J]. *Food Engineering Reviews*, 2018, 10(4): 198-210.
- [13] PHAN V M, JUNYUSEN T, LIPLAP P, et al. Effects of ultrasonication and thermal cooking pretreatments on the extractability and quality of cold press extracted rice bran oil[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(2): e12975.
- [14] ZHOU Q, YANG M, HUANG F, et al. Effect of pretreatment with dehulling and microwaving on the flavor characteristics of cold-pressed rapeseed oil by GC-MS-PCA and electronic nose discrimination[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(7): C961-C970.
- [15] LI D, WANG D, XIAO H, et al. Simultaneous analysis of freecombined phytosterols in rapeseed and their dynamic changes during microwave pretreatment and oil processing[J]. *Foods*, 2022, 11(20): 3219.
- [16] YU J, WANG M, ZHANG M, et al. Effect of infrared ray roasting on oxidation stability and flavor of virgin rapeseed oils[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(7): 2990-3000.
- [17] DENG B X, LI B, LI X D, et al. Using short-wave infrared radiation to improve aqueous enzymatic extraction of peanut oil: evaluation of peanut cotyledon microstructure and oil quality[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 120(2): 1700285.
- [18] AHMED I A M, USLU N, OZCAN M M, et al. Effect of conventional oven roasting treatment on the physicochemical quality attributes of sesame seeds obtained from different locations[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 128109.
- [19] GAO P, DING Y, CHEN Z, et al. Characteristics and antioxidant activity of walnut oil using various pretreatment and processing technologies[J]. *Foods*, 2022, 11(12): 1698.
- [20] MORADI N, RAHIMI M. Effect of simultaneous ultrasound/pulsed electric field pretreatments on the oil extraction from sunflower seeds[J]. *Separation Science and Technology*, 2018, 53(13): 2088-2099.

- [21] JI J, LIU Y, SHI L, et al. Effect of roasting treatment on the chemical composition of sesame oil[J]. *LWT*, 2019, 101: 191-200.
- [22] HU H, LIU H, SHI A, et al. The effect of microwave pretreatment on micronutrient contents, oxidative stability and flavor quality of peanut oil[J]. *Molecules*, 2019, 24(1): 62.
- [23] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Impact of roasting and extraction methods on chemical properties, oxidative stability and Maillard reaction products of peanut oils[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(5): 2436-2445.
- [24] GUDERJAN M, ELEZ-MARTÍNEZ P, KNORR D. Application of pulsed electric fields at oil yield and content of functional food ingredients at the production of rapeseed oil[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2007, 8(1): 55-62.
- [25] JI J, LIU Y, WANG D. Comparison of de-skin pretreatment and oil extraction on aflatoxins, phthalate esters, and polycyclic aromatic hydrocarbons in peanut oil[J]. *Food Control*, 2020, 118: 107365.
- [26] AZADMARD-DAMIRCHI S, HABIBI-NODEH F, HESARI J, et al. Effect of pretreatment with microwaves on oxidative stability and nutraceuticals content of oil from rapeseed[J]. *Food Chemistry*, 2010, 121(4): 1211-1215.
- [27] CIOU J Y, CHEN H C, CHEN C W, et al. Relationship between antioxidant components and oxidative stability of peanut oils as affected by roasting temperatures[J]. *Agriculture-Basel*, 2021, 11(4): 300.
- [28] YIN W T, SHI R, LI K, et al. Effect of microwave pretreatment of sunflower kernels on the aroma-active composition, sensory quality, lipid oxidation, tocopherols, heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons of sunflower oil[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2022, 170: 114077.
- [29] REZIG L, HARZALLI Z, GHARSALLAH K, et al. Microwave and roasting impact on pumpkin seed oil and its application in full-fat mayonnaise formula[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2732.
- [30] WANG M, ZHANG Y, WAN Y, et al. Effect of pretreatments of camellia seeds on the quality, phenolic profile, and antioxidant capacity of camellia oil[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1023711.
- [31] ZHANG Y, LI X, LU X, et al. Effect of oilseed roasting on the quality, flavor and safety of oil: A comprehensive review[J]. *Food Research International*, 2021, 150: 110791.
- [32] ZHANG D, LI X, CAO Y, et al. Effect of roasting on the chemical components of peanut oil[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2020, 125: 109249.
- [33] NIU Y, ROGIEWICZ A, WAN C, et al. Effect of microwave treatment on the efficacy of expeller pressing of brassica napus rapeseed and brassica juncea mustard seeds[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(12): 3078-3084.
- [34] 从艳霞. 微波物理场下油菜籽中 canolol 生成的分子机制研究[D]. 武汉: 中国农业科学院, 2020.
- CONG Y X. Study on the molecular mechanism of canolol formation in rapeseed under microwave physical field[D]. Wuhan: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020
- [35] YANG M, ZHENG C, ZHOU Q, et al. Influence of microwaves treatment of rapeseed on phenolic compounds and canolol content[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(8): 1956-1963.
- [36] HUANG Y, LIU C, GE Z, et al. Influence of different thermal treatment methods on the processing qualities of sesame seeds and cold-pressed oil[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134683.
- [37] XU B, YOU S, ZHANG L, et al. Comparative analysis of free/combined phytosterols—degradation and differential formation of oxidation products during heating of sunflower seed oil[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2022, 155: 112966.
- [38] 王天西. 食品中反式脂肪酸的来源、健康风险和管控措施研究[J]. *市场监管与质量技术研究*, 2023(1): 57-61.
- WANG T X. Research on sources, health risks and control measures of trans fatty acids in food[J]. *Market Regulation and Quality Technology Research*, 2023(1): 57-61.
- [39] 程莉, 甘源, 唐晓琴, 等. 油炸食品中多环芳烃污染状况分析及健康风险评估[J]. *中国卫生检验杂志*, 2021, 31(15): 1909-1913.
- CHENG L, GAN Y, TANG X Q, et al. Pollution analysis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in fried food[J]. *Chin J Health Lab Tec*, 2021, 31(15): 1909-1913.
- [40] 石龙凯, 刘玉兰, 崔瑞福, 等. 油炸食品中多环芳烃含量影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(3): 79-83+90.
- SHI L K, LIU Y L, CUI R F, et al. Effects of high temperature roasting on polycyclic aromatic hydrocarbons in edible oils[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(3): 79-83+90.
- [41] 张晨霞, 盛冰莹, 张咪, 等. 不同产地芝麻所制芝麻油中杂环胺的分析测定[J]. *中国油脂*, 2023, 48(4): 87-93.
- ZHANG C X, SHENG B Y, ZHANG M, et al. Determination and analysis of heterocyclic aromatic amines in sesame oil extracted from sesame of different producing areas[J]. *China Oils and Fats*, 2023, 48(4): 87-93.
- [42] 洪振童, 陈洁, 范璐, 等. HS-SPME-GC-MS 分析冷榨和热榨葵花籽油的挥发性物质[J]. *中国油脂*, 2015, 40(2): 90-94.
- HONG Z T, CHEN J, FAN L, et al. Volatile compounds in cold - pressed sunflower seed oil and hot - pressed sunflower seed oil by HS - SPME - GC - MS[J]. *China Oils and Fats*, 2015, 40(2): 90-94.
- [43] 安浩. 葵花籽油加工过程中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的形成及抑制研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- AN H. Formation and inhibition of 3-Chloro-1,2-Propanediol fatty acid esters and glycidyl esters during processing in sunflower oil[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.
- [44] 师瑞. 葵花籽预处理对葵花籽油的香气活性组分和感官品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- SHI R. Effect of sunflower seed pretreatment on the aroma-active composition and sensory quality of sunflower oils[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022. ☞
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。